

## VOCs 汚染地盤の原位置嫌気バイオ浄化技術の開発（その2）

－微生物栄養材クロロクリン®の現場適用及び設計手法の確立－

緒方 浩基 四本 瑞世 三好 悟  
久保 博 新村 亮 藤井 研介  
(本社土木技術本部)

### In-situ Soil Treatment for Anaerobic Bioremediation of VOC Contamination (No.2)

- Field Test of Chloroclean® and Design Methods for Bioremediation Using Chloroclean® -

Hiroki Ogata Mizuyo Yotsumoto Satoru Miyoshi  
Hiroshi Kubo Akira Shimmura Kensuke Fujii

#### Abstract

This paper describes VOC degradation in field scale, diffusion in groundwater and consumption of Chloroclean®, and a management method developed by Obayashi corporation.

Field tests show that VOC degradation is enhanced by Chloroclean, and its diffusion in groundwater can be easily evaluated by total carbon. Thus, total carbon can be a monitoring item for controlling diffusion in groundwater. Chloroclean is well absorbed in soil, but it is soon degraded to organic acids which are only slightly adsorbed in soil, so they diffuse well in groundwater. A lot of Chloroclean is required to achieve the anaerobic condition that allows microorganisms to degrade VOCs, because there are a lot of potential oxidized substances that should be reduced, especially ferric compound in soil.

#### 概要

VOCs 汚染地盤の原位置嫌気バイオ浄化における、当社開発地盤注入資材「クロロクリン」を用いて、現場における VOCs 分解性および現場管理手法、さらに、設計手法の確立のため、栄養材の地盤中の移動性や栄養材必要量の検討を行った。

試験工事において、クロロクリン（以下、栄養材）により良好に VOCs 分解が起こることが確認できた。さらに、地盤中の栄養材拡散管理手法として、“全炭素濃度”を評価する簡易手法が有効であることが評価できた。また、地盤中の移動性は、栄養材自体は地盤に吸着されやすいが、速やかに有機酸に分解されることで移動性が向上し、結果的に移動性は良いと評価できた。次に、栄養材必要量であるが、VOCs 分解微生物が活性化する嫌気状態にするには、地盤中の潜在的酸化物質を還元する必要がある、特に、地盤中の酸化鉄の還元に多くの栄養材が消費されることが分かった。

#### 1. はじめに

ドライクリーニングや電子部品の洗浄剤、溶剤として使用されていたテトラクロロエチレン（以下、PCE）、トリクロロエチレン（以下、TCE）などの揮発性有機塩素化合物（以下、VOCs）の土壌、地下水汚染を、より低コストで浄化することが求められている。よって、原位置嫌気バイオ浄化に着目し、食品添加物を主材とした安全性の高い、独自の栄養材「クロロクリン」を開発した<sup>1)</sup>。このクロロクリンを用いて、実汚染土による VOCs 分解の室内試験において、2～3ヶ月と短期間で分解できたことを昨年報告した<sup>1)</sup>。

本報では、この栄養材を用いた原位置嫌気バイオ浄化工法確立のために、以下の課題を抽出し、これらの課題

に対し試験工事および室内試験による検証および評価を行ったので、報告を行う。

- 1) 実際の VOCs 汚染現場における VOCs 分解性能。
- 2) 浄化工事の施工管理として、栄養材拡散管理に適したモニタリング項目の抽出。
- 3) 浄化工事の設計のためには、浄化工期と栄養材の必要量が重要である。浄化工期は、栄養材の地盤中の移動期間と VOCs 分解期間よりなるが、このうち移動に係わる要因の把握。栄養材の必要量に関しては、栄養材を消費する要因の把握。

#### 2. 試験工事による VOCs 分解性能評価

##### 2.1 目的

クロロクリン（以下栄養材）を用いて、実際の VOCs

汚染現場においても VOCs の分解効果が確認できるか試験工事を行った。

## 2.2 試験工事の概要

**2.2.1 試験工事実施サイト** 試験工事を行ったサイトは、稼働中の工場であり、サイトの地下水の主要な汚染物質は、TCE であった。地下水揚水により、現在も地下水汚染対策を行っている。試験工事の対象とする帯水層の土質は、粘土混じり砂礫であり、平均的な粒度分布を Table 1 に示す。帯水層の厚さは、5~7m程度であり、地下水位は地表から-3~-5mであった。また、現地の地下水の平均的な理化学性、及び平均的な地下水中の VOCs 濃度をそれぞれ、Table 2, Table3 に示す。

**2.2.2 注入井戸、観測井戸等の配置** 栄養材注入井戸、観測井戸、および栄養材を注入する設備の配置を Fig. 1 に示す。現地に栄養材を注入する設備を設置し、栄養材を注入する井戸を約 10m 離れた位置に 2 本設置した。また、2 本の注入井戸間に 4 本の観測井戸を設置し、地下水質のモニタリングを実施した。なお、試験工事対象範囲には、既設の地下水対策用の揚水井戸が 2 本あった。

**2.2.3 栄養材の注入** 現場に栄養材の高濃度液 (30%) を自動で希釈し、地盤中に自動で注入する設備 (Photo 1 参照) を設置した。栄養材 30% の液を、現場の深井戸から揚水した汚染されていない地下水により、希釈タンクで 0.3~0.5% 濃度に希釈した。この希釈液を各注入井戸から約 1m<sup>3</sup>/日の割合で地盤に注入した。

**2.2.4 地下水質のモニタリング方法** 溶存酸素は現地で携帯型測定器により測定したが、その他の物質は、現地で採取した地下水を試験室に持ち帰り、測定を行った。硫酸イオン、硝酸イオンは、イオンクロマトグラフにより測定し、鉄は、原子吸光光度計により測定した。全有機炭素濃度 (以下、TOC) は 2 チャンネル方式の計測器により測定した。VOCs はヘッドスペースガスクロマトグラフ法 (DELCD 検出器) により測定した。

## 2.3 試験工事の結果

栄養材の到達が良好であった観測井戸 1 で、モニタリングした地下水中の VOCs 濃度、酸化物質濃度や TOC を示す。

**2.3.1 地下水中の VOCs 濃度** 測定した結果を Fig. 2 に示す。クロロクリン注入後、約 2 ヶ月で TCE の濃度が低下し、これに伴い、cis-DCE の濃度が上昇した後、次第に低下し、約 8 ヶ月で、TCE, 1,1-DCE, cis-DCE とともに環境基準値以下となった。

**2.3.2 地下水中の酸化物質濃度、TOC** 測定した結果を Fig. 3 に示す。なお、硝酸イオンは硝酸態窒素濃度として、硫酸イオンは、硫酸態硫黄濃度として示す。地下水中の TOC がクロロクリン注入開始後約 1 ヶ月で徐々に上昇し、それに伴い地下水中の溶存酸素濃度、硝酸イオン濃度が低下した後に、溶存鉄濃度が上昇し、次第に硫酸イオン濃度が低下してきた。半年経過後、注入井戸の

Table 1 粒度分布  
Grain Size Distribution

| 分類     | レキ (>2mm) | 砂 (2mm~75μm) | シルト (75μm~5 μm) | 粘土 (<5 μm) |
|--------|-----------|--------------|-----------------|------------|
| 割合 (%) | 48        | 27           | 15              | 10         |

Table 2 地下水の理化学性  
Properties of Groundwater

| pH (H <sub>2</sub> O) | 溶存酸素 | 硝酸態窒素 | 全鉄  | 硫酸イオン | TOC |
|-----------------------|------|-------|-----|-------|-----|
| 6.6                   | 4.5  | 7.4   | 0.1 | 18.6  | 3.3 |

(単位: mg/L)

Table 3 地下水中の VOCs 濃度  
VOCs Concentration in Groundwater

| TCE  | シス-1,2-ジクロロエチレン (以下, cis-DCE) | 1,1-ジクロロエチレン (以下, 1,1-DCE) | 塩化ビニル (以下, VC) |
|------|-------------------------------|----------------------------|----------------|
| 0.59 | 0.008                         | 0.16                       | <0.005         |

(単位: mg/L)

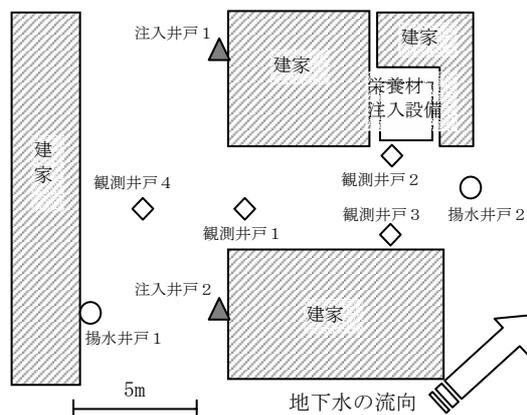


Fig. 1 試験工事井戸や注入設備の配置  
Layout of Wells and Injection Equipment



Photo 1 栄養材注入設備  
Nutrient Injection Equipment

一時期の閉塞による栄養材注入量の低下や、地下水流向の関係で、観測井戸 1 の TOC 濃度が低下してきた際に、硫酸イオン濃度の上昇が見られた。

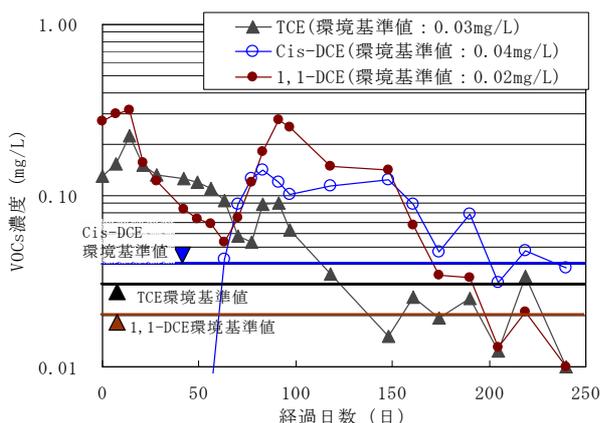


Fig. 2 地下水中のVOCs濃度  
Concentration of VOCs in Groundwater

### 3. 栄養材拡散管理のためのモニタリング項目の検討

#### 3.1 目的

試験工事では、地下水の流向が複雑であるため、地下水流向の把握が困難であった。さらに、栄養材の拡散はTOCで把握するが、当初、観測井戸でのTOCの上昇が遅いのは、栄養材が分解されたためなのか、地下水流向によるものか判断が難しかった。そこで、TOCを測定する際に情報として得られる“全炭素濃度(以下、TC)”に着目し、TCが簡易な地下水流向や栄養材拡散の指標となるのではないかと考え、地盤中で吸着、分解されないトレーサーを注入し、トレーサーとの比較により有効性を評価した。

#### 3.2 TCによる注入資材拡散状況把握手法

地下水中の拡散評価のために、地下水中のTOCを測定するが、このTOCは、2チャンネル方式の測定器で測定する場合、地下水中のTCと全無機炭素濃度(以下、IC)を測定し、その差をTOCとして示している。よって、TOCの測定の際に、TCのデータも同時に得られる。このTCは、分解されたTOC(IC)も含んだデータであるので、トレーサー同様にTOCより早く観測井戸で濃度上昇すると考えられ、早い段階での地下水の流れや栄養材の拡散状況評価を可能にすると考えられた。

#### 3.3 トレーサーの注入

当現場にトレーサーとして臭素を注入した。トレーサーとして臭素の注入濃度が、40mg/Lとなるように栄養材に臭化ナトリウムを添加し、栄養材と共に、各注入井戸から約1m<sup>3</sup>/日の割合で、約2ヶ月間注入を行った。

#### 3.4 TCとトレーサーの比較試験結果

TCがトレーサーと同様に地下水流向等を評価することが可能を検証するために、Fig. 4に観測井戸1、4でのトレーサーである臭素濃度とTCの比較を行った。Fig. 4には、TC以外にも、TOC、ICも示すが、TOCは、分解を

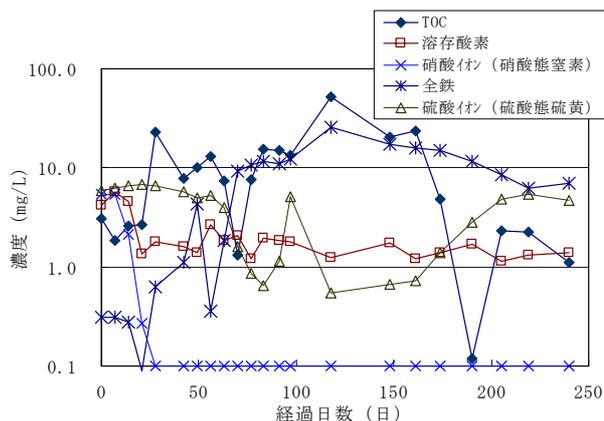


Fig. 3 地下水中の酸化物質濃度, TOC  
Concentration of Oxidized Substances and TOC in Groundwater

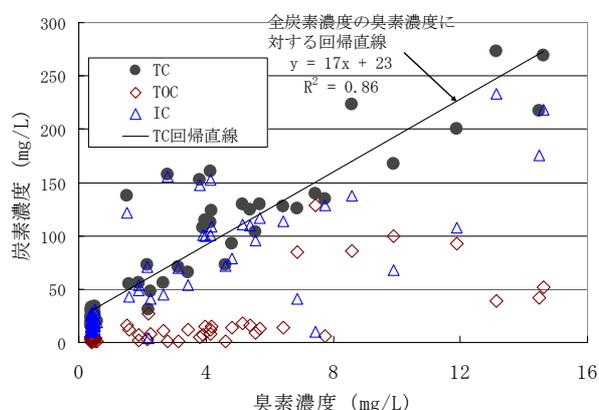


Fig. 4 TC, TOC, ICと臭素濃度の関係  
Comparisons of TC, TOC, IC with Concentration of Bromine

受けるために臭素との相関は低かった。一方、TCは、臭素とかなり良い正の相関(回帰係数0.86)を示しており、トレーサーが観測井戸で検出されると同時期にTCの濃度上昇が見られることを示している。

さらに、地下水位の変動が激しく、地下水流向の評価が困難であった観測井戸1と4の臭素とTCの濃度変化をFig. 5に示す。まず、注入井戸から近い観測井戸1ではなく、観測井戸4で臭素濃度が先に上昇しており、注入井戸から観測井戸4へは、いわゆる“水みち”が存在すると考えられた。一方、TCも観測井戸4の方が急に上昇しており、“水みち”の存在をトレーサー同様に示していることが分かる。

このようにTCは、地下水の流向及び栄養材の拡散評価に有効であることが示された。よって、TOC以外にTCのデータも検証することで、地下水の流向による栄養材拡散状況の把握が可能であり、TCとTOCのデータを比較することで、TOCの地盤中の分解状況等についても把握でき、栄養材が計画通り拡散しているかどうかの検証に利用することが可能である。

## 4. 浄化工事における設計手法の確立

### 4.1 目的

試験工事により、栄養材による良好な VOCs 分解性能が示された。しかし、浄化工法として確立するには、さらに精度のよい設計手法の確立が必要である。ここでは、浄化工期と栄養材の必要量に関する設計手法確立を目的として、室内試験および評価を行った。

### 4.2 浄化工期の要因評価

**4.2.1 目的** 浄化工期は、栄養材の地盤中の移動期間と、VOCs の分解期間の総和と考えられる。VOCs の分解期間は、前回報告<sup>1)</sup>の室内試験により評価しており、ここでは、地盤中の栄養材の移動期間を求めるために必要な、栄養材の地盤中での遅延性の評価をカラムによる通水およびバッチによる吸着試験で行った。

#### 4.2.2 カラム試験による栄養材の遅延性の評価

(1) 試験の方法 カラム試験は、内径 100mm 高さ 500mm のアクリル製カラムを用いて、このカラム内に、試験工事を実施したサイトの土を充填し、現地の地下水を通水させ、予め間隙を地下水で満たした後、栄養材を TOC として 1000mg/l となるように溶解させ、また、土に吸着されにくい物質として臭素を添加して通水した。その際、通水液の溶存酸素濃度 (以下、DO) は約 8mg/l に調整した。試験当初、酸化還元電位が、十分な嫌気状態にまで下がらずに、pH が低下してきたため、栄養材通水 60 日後に、通水液に pH 緩衝材を添加した。それと同時に、硝酸イオン、硫酸イオンもそれぞれ、約 40mg/l、30mg/l となるよう添加し、さらに通水を継続した。カラム出口の透過液は、定期的にサンプリングし、TOC、酸化還元電位、pH、酸化物質である DO、硝酸イオン濃度、硫酸イオン濃度、2 価鉄濃度を測定した。

また、追加試験で、第 1 回のカラム試験の透過液を、同様に作成した追加のカラムに透過させて、カラム透過液の移動性試験を行った。

(2) 試験の結果 室内試験では、栄養材濃度を TOC として測定し、この TOC と臭素のカラム透過前後の濃度を測定した。その通水液中の濃度比を Fig. 6 に示すが、このグラフに示すようにカラムを透過する TOC は臭素に比べ、濃度上昇が遅くなっている。これは、栄養材の移動が遅延していることを示しており、栄養材が土壌に吸着しているものと考えられた。一方、追加試験のカラムでは、TOC は臭素濃度と同様に濃度上昇を示しており、移動の遅延があまりないことを示している。栄養材は分解が早く、栄養材が 1 本目のカラムを透過する間に有機酸に分解されてしまう。この分析結果を Table 4 に示す。この有機酸の地盤への吸着性が低いため、追加のカラムを透過する際の遅延が、あまりなかったと考えられた。

#### 4.2.3 バッチ試験による吸着性の評価

(1) 試験方法 栄養材および有機酸 (n-酪酸 Na, プロピオン酸 Na, 酢酸 Na を添加) の所定濃度の液 100mL を

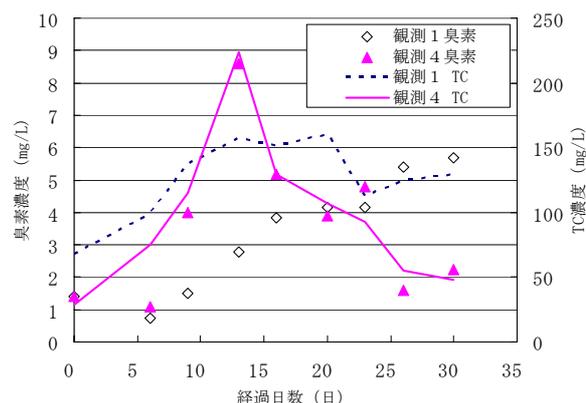


Fig. 5 観測井戸 1, 4 での TC と臭素濃度の推移  
Concentration of TC and Bromine at Monitoring Well No.1 and No.4

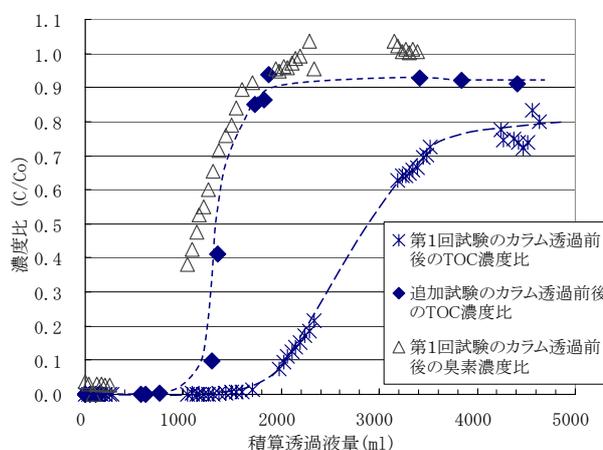


Fig. 6 カラム透過前後の TOC, 臭素濃度推移  
Concentration of TOC and Bromine in Solution through Column

Table 4 第 1 回試験のカラム透過液中の栄養材、有機酸濃度  
Concentration of Nutrient and Organic Acid in Solution through the Column of the First Test

|                 | 栄養材 | n-酪酸 | プロピオン酸 | 酢酸  |
|-----------------|-----|------|--------|-----|
| TOC 換算濃度 (mg/L) | 0   | 232  | 44     | 520 |

100mL 容メジウム瓶に入れ、試験工事のサイトの土 50g を投入した。3 時間振とう後、遠心分離し、0.45 $\mu$ m のメンブレンフィルターでろ過した。ろ液の TOC 濃度 (平衡液層濃度) を測定し、土壌への吸着量を算定した。

(2) 試験の結果 土壌への吸着量から土壌の蓄積作用を示す遅延係数を求めた。その結果を、Fig. 7 に示す。全く吸着がない場合は、遅延係数は 1 となる。なお、土壌の間隙率は 0.3、乾燥密度は 1.6 であった。栄養材は添加濃度が低い場合、遅延係数が高くなるが、濃度が高くなるに従い、遅延係数は低くなる。一方、いずれの有機酸の遅延係数も低かったが、濃度が高くなるにつれて、若干遅延係数が高くなる傾向であった。なお、臭素

の遅延係数も測定したが、臭素濃度 0.15% で、約 2 程度であり、有機酸は臭素同様に土壤に吸着しにくく、地盤中での遅延がほとんどないことが確認できた。実工事においても、栄養材は注入後、すぐに有機酸に分解されるため、地盤にはあまり吸着されず、移動、拡散するものと考えられる。

### 4.3 栄養材消費量の要因評価

**4.3.1 目的** VOCs 以外の消費要因として、酸化物質が考えられるが、地下水中以外に、地盤中に存在する酸化物質（鉄、マンガン）の影響も考えられる。しかし、その影響に関しては、明らかになっておらず、カラム試験により評価を行った。

**4.3.2 試験方法** カラム試験の方法は、4.2.2 項に示した方法と同様である。なお、この試験ではカラム内の土の分析を行う必要があったので、カラム内が、cis-DCE の分解可能な嫌気状態にまで酸化還元電位が下がった時点で、カラムを解体し、解体土の 2 価鉄、2 価マンガンの分析を行った。

### 4.3.3 試験結果

(1) カラム透過液の性状 Fig. 8 に、カラム透過液の酸化還元電位と各酸化物質濃度変化を示した。なお、結果は、栄養材以外に、酸化物質を含んだ液を通水した 60 日後以降について示した。

通水開始から 60 日経過後、酸化還元電位（塩化銀電極直読値）は、200mV 付近から -100mV まで低下後、-100mV 付近の値が、約 30 日間続いた後、大きく低下、-500~-600mV まで下がり、強い還元雰囲気になった。次に、透過液中の各酸化物質濃度について、D0 は、当初 3mg/l 検出されたが、酸化還元電位がマイナスの値を示すと、1mg/l 以下の値となった。硝酸イオン、2 価鉄、硫酸イオンについて、酸化還元電位が 0mV 付近で、硝酸が検出されなくなり、-100mV 付近で、2 価鉄が検出され始め、それと同時に硫酸イオンも検出されなくなった。2 価鉄濃度は、72~90 日後まで 3~5.5mg/l の値を示し、その後 1~2mg/l で推移した。試験を通して、高濃度で検出されることはなかった。透過液の 2 価マンガンは、今回、継続して分析しなかったが、2 価鉄濃度が 4mg/l 程度と比較的高く検出された透過液について分析を試みたが、0.6mg/l と非常に低い値であった。なお、透過液中の栄養材濃度（TOC）は、図示しないが、初期値との濃度比（ $C/C_0$ ）は 0.6~0.8 で推移した。

(2) カラム解体土の 2 価鉄、2 価マンガン カラムの解体は、酸化還元電位が -600mV まで低下した時点（通水開始約 110 日後）で行った。Table 5 に、カラム解体土の粒径 2mm 以下の 2 価鉄量、Table 6 に、カラム解体土の粒径 2mm 以下の 2 価マンガン量の分析結果を示した。

カラム試験後の土の 2 価鉄量は 9200mg/kg 乾土であった。透過液中に溶出し排出された 2 価鉄量が、積算量で 11mg/kg 乾土と少ないことを考えると、鉄の評価を地下水等の水質分析で評価することは困難であると考えられ

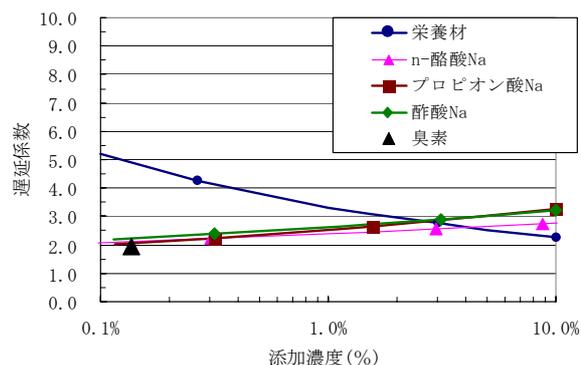


Fig. 7 栄養材, 有機酸の遅延係数 Retardation Coefficient of Nutrient and Organic Acid

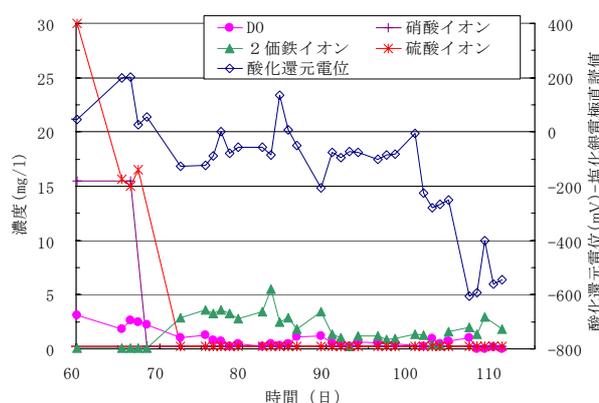


Fig. 8 透過液中の酸化還元電位と酸化物質濃度の変化 Redox potential and Oxidized Substance Concentration in Solution through Column

Table 5 カラム解体前後の土中の鉄分析結果 Concentration of Total iron and Ferrous in Soil before or after Column Test

| 項目             | カラム試験前<br>全鉄 | 2 価鉄   |        |
|----------------|--------------|--------|--------|
|                |              | カラム試験前 | カラム試験後 |
| 分析方法           | フッ化水素酸硫酸分解   |        |        |
| mg/kg 乾土(<2mm) | 41000        | 1700   | 9200   |

Table 6 カラム試験前後の土中のマンガン分析結果 Concentration of Manganese in Soil before or after Column Test

| 項目             | カラム試験前<br>全マンガン | 2 価マンガン   |        |
|----------------|-----------------|-----------|--------|
|                |                 | カラム試験前    | カラム試験後 |
| 分析方法           | 過塩素酸分解          | 酢酸アモニウム抽出 |        |
| mg/kg 乾土(<2mm) | 630             | 8         | 22     |

た。一方、2 価マンガン量は 22mg/kg 乾土と、鉄に比べて非常に少ないことがわかった。

**4.3.4 考察** カラム試験において、酸化還元電位が -600mV に低下するまでに、各酸化物質が消費した水素量を概算した。結果を Table 7 に示した。これより、D0、硝酸イオン、硫酸イオンを高濃度含む場合においても、還元されやすい酸化鉄を多く含む地盤では、栄養材消費

に占める鉄還元割合が 60%以上と、他の酸化物質よりも影響が大きいことがわかった。一方、マンガン還元の影響はほとんどないことがわかった。

土壌中に存在する酸化鉄が栄養材の消費に関与することが今回のカラム試験により明らかになった。しかし、栄養材の必要量の設計を行うには、還元されやすい土壌中の酸化鉄を事前に評価することが望ましい。還元されやすい酸化鉄および酸化マンガン量の評価として、土壌養分分析<sup>2)3)</sup>による溶解性鉄、マンガンの分析法により評価した。その結果を Table 8 に示す。カラム試験後の 2 価鉄量と比較するとジチオナイト還元法 (6800mg/kg 乾土) の約 1/2 量、酸性シュウ酸溶解法 (2600mg/kg 乾土) の 1.4 倍量に相当した。この様に、栄養材消費量に影響する還元されやすい酸化鉄の量は、土の溶解性鉄を事前に分析することで推定が可能である。

一方、還元性のマンガンは、ハイドロキノン-酢酸アンモニウム抽出の溶解性マンガンの 1/10 以下であった。生成した 2 価マンガンの量も少なかったこともあり、明確な関係が見出せなかった。

### 5. まとめ

クロロクリンを用いた試験工事および、試験工事をモデルとした室内試験等により以下の知見を得た。

- 1) クロロクリンは、実現場の地下水汚染に対しても VOCs 分解効果があった。
- 2) クロロクリンの地盤中の拡散状況の把握においては、全炭素濃度 (以下, TC) により簡易に把握することができる。TC は、2 チャンネル方式の全有機炭素濃度 (以下, TOC) 分析法により、簡易にデータ得ることができ、また、TC と TOC を比較することにより、地盤中でのクロロクリンの消費程度も把握することが可能である。
- 3) クロロクリンは、特に低濃度においては、地盤に吸着されやすいが、クロロクリンから、地盤への吸着性がほとんどない有機酸に速やかに分解されるため、有機酸として、地盤中を拡散する。よって、クロロクリンは、あまり吸着されずに地盤中を移動する。
- 4) クロロクリンの地下水汚染浄化における必要量は、地盤、地下水中の酸化物質 (酸素、硝酸、硫酸、鉄、マンガン) による影響が大きく、特に地盤中の還元されやすい酸化鉄の要因が大きい。
- 5) 地盤中の還元されやすい鉄の存在量は、地下水質から

Table 7 各酸化物質の栄養材消費割合  
Ratio of Nutrient Consumed by Oxidized Substances

| 酸化物質の種類 | 水素消費量の算出方法                      | 水素消費量<br>H <sub>2</sub> mmol/kg<br>乾土 | 全体を 100 とした際各酸化物質が消費した水素量の割合% |
|---------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| 酸素      | (入口* - 出口)濃度差 × 積算通水量 × 水素消費係数  | 2.12                                  | 4.4                           |
| 硝酸      |                                 | 9.07                                  | 18.8                          |
| 硫酸      |                                 | 6.36                                  | 13.2                          |
| 鉄       | (透過液 2 価鉄 + 土の生成 2 価鉄) × 水素消費係数 | 30.5                                  | 63.4                          |
| マンガン    | 土の生成 2 価マンガンの × 水素消費係数          | 0.008                                 | 0.0                           |

\*入口濃度：溶存酸素 8mg/l, 硝酸イオン 40mg/l, 硫酸イオン 30mg/l

Table 8 栄養材消費量予測手法  
(土中の溶解性鉄、マンガンによる評価)  
Estimation Method of Nutrient Demand  
(Estimation by Soluble Iron and Manganese in Soil)

| 項目              | 鉄          |                   |                 |
|-----------------|------------|-------------------|-----------------|
|                 | 2 価鉄       | 溶解性鉄 (遊離酸化鉄)      |                 |
|                 | カラム試験後     | カラム試験前            |                 |
| 分析方法            | フッ化水素酸硫酸分解 | ジチオナイト-ケツ酸塩溶解     | 酸性シュウ酸塩溶解       |
| mg/kg 乾土 (<2mm) | 9200       | 17000<br>(0.54)*1 | 6500<br>(1.4)*1 |

\*1: カラム試験後の 2 価鉄と溶解性鉄との比

| 項目              | マンガン       |                    |
|-----------------|------------|--------------------|
|                 | 2 価マンガン    | 溶解性マンガン            |
|                 | カラム試験後     | カラム試験前             |
| 分析方法            | 酢酸アンモニウム抽出 | ハイドロキノン-酢酸アンモニウム抽出 |
| mg/kg 乾土 (<2mm) | 22         | 360<br>(0.064)*2   |

\*2: カラム試験後の 2 価マンガンの溶解性マンガンの比

推定することは困難であるが、事前に土壌試料を化学分析することで推定が可能である。

### 参考文献

- 1) 四本ら: VOCs 汚染地盤の原位置嫌気バイオ浄化技術の開発, 大林組技術研究所所報, No. 69, 2005
- 2) 土壌環境分析法, 博友社, 2000
- 3) 土壌養分分析法, 養賢堂, 2002